

УДК 681.518

ИНФОРМАЦИОННОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЛОКА ДИАГНОСТИКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ ОБМОТОК ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА КТМ

А.Г. Качкин, В.М. Павлов

Томский политехнический университет

E-mail: rumble@sibmail.com

Составлен перечень входных/выходных сигналов и данных блока диагностики системы цифрового управления источниками питания обмоток полоидального поля токамака КТМ. Разработаны алгоритмы сбора, регистрации, расчета и контроля параметров источника питания. Предложены алгоритмы оперативной диагностики источника питания. Алгоритмы экспериментально проверены на макете источника питания.

Ключевые слова:

Система управления, система диагностики, токамак, источник питания, полоидальные обмотки, тиристорный преобразователь, алгоритм диагностики, алгоритм расчета параметров.

В настоящее время в рамках программы ИТЭР (международного экспериментального термоядерного реактора) в г. Курчатов (Казахстан) ведутся работы по созданию материаловедческого токамака КТМ. Основой технологической системы токамака КТМ является электромагнитная система (ЭМС), в состав которой входят гальванически не связанные катушки. При пропускании через них электрического тока, создается электромагнитное поле, инициирующее и удерживающее плазму внутри вакуумной камеры токамака. В состав ЭМС токамака входят: обмотки полоидального поля PF_1-PF_6 , центральный соленоид (индуктор) CS , обмотка тороидального поля TF , обмотка горизонтального поля HFC [1]. Для ввода тока в обмотки катушек используются мощные источники питания (ИП) на базе трехфазных тиристорных преобразователей, подключенных к обмоткам трансформатора таким образом, чтобы обеспечивалась 12-пульсная схема выпрямления тока. Управление и диагностика источников питания обмоток осуществляется системой цифрового управления (СЦУ), большинство функций которой реализовано на уровне программного обеспечения [2].

Основным вычислительным элементом СЦУ является промышленный контроллер, конструктивно выполненный из двух частей: блока управления и блока диагностики тиристорных преобразователей. К функциям блока управления относятся: логико-программное управление тиристорным преобразователем; регулирование по контуру с обратной связью тока в обмотке; противоаварийная защита источника питания. К функциям блока диагностики относятся: сбор, регистрация и обработка данных; оперативная диагностика неисправностей силовой части ИП и измерительных приборов.

На рис. 1 представлена укрупненная структурная схема СЦУ источником питания. Преобразователь измерительный телеметрический (ПИТ) измеряет ток в ветвях трёх тиристорных, получая сигналы напряжения с резисторов, последовательно подключенных к тиристорам. Блок предварительной обработки сигналов (БПОС) предназначен для измерения мгновенных значений напряжения и тока

в нагрузке источника питания (обмотке). Результаты измерения с блоков ПИТ и БПОС передаются в блок диагностики по оптоволоконной линии связи, обеспечивающей гальваническую развязку силовой и управляющей части ИП. От вышестоящей системы управления плазмой (СУП) в блок диагностики поступают сигналы уставок. Все измерительные данные оперативно сохраняются на сервере информационно-измерительной системы (ИИС). Блок управления формирует управляющие сигналы, на основании результатов измерений и расчетов, полученных в блоке диагностики.

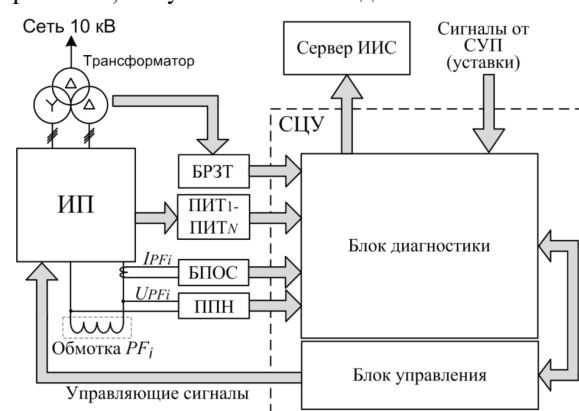


Рис. 1. Структурная схема цифровой системы управления

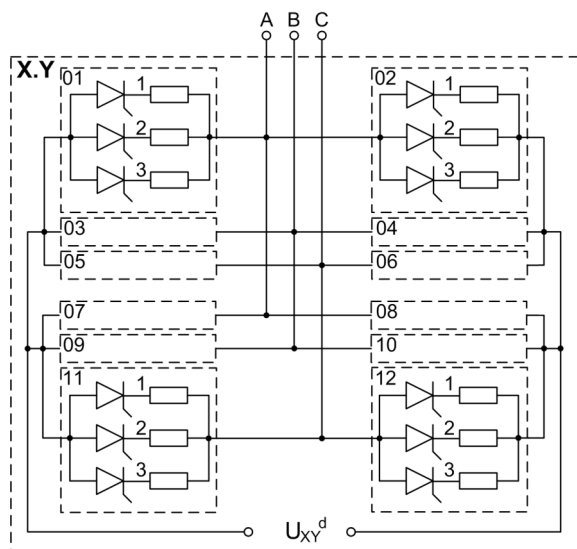
На основании структурных и принципиальных схем источников питания обмоток PF_1-PF_6 , описанных в техническом проекте на ЭМС токамака КТМ определяется состав параметров ИП, регистрируемых СЦУ в результате прямых измерений (табл. 1).

Каждый ИП состоит из включенных параллельно и последовательно унифицированных тиристорных преобразователей (УТП). На рис. 2 представлена структурная схема УТП, который используется в источниках питания ЭМС токамака. Преобразователь нумеруется в зависимости от условного порядка в системе ЭМС и состоит из 12-ти тиристорных сборок по 3 параллельно соединенных тиристора в каждой. Последовательно с каждым тиристором подключен шунтирующий измерительный резистор.

Таблица 1. Таблица параметров источников питания обмоток $PF_1 - PF_6$

| Технологическое оборудование | Мгновенное значение | Обозначение | Кол-во | Диапазон измерения | Ед. изм. |
|---|--|-------------|--------|--------------------|----------|
| Унифицированные тиристорные преобразователи | Тока ветви тиристора | I_{XYr}^m | K | ± 2500 | A |
| | Напряжения на выходе преобразователя | U_{XY}^m | 2 | 0...500 | B |
| Нагрузка: обмотка PF_i | Напряжения на нагрузке (обмотка PF_i) | U_{PFi}^m | 1 | 0...500 | B |
| | Тока в нагрузке (обмотка PF_i) | I_{PFi}^m | 1 | ± 30 | кA |

i – номер обмотки PF (от 1 до 6); $K=72$ для обмоток PF_1, PF_2, PF_3, PF_6 ; $K=144$ для обмоток PF_4, PF_5 ; XY – номер тиристорного преобразователя (например 3.1, где $X=3, Y=1$); n – номер тиристорной сборки в УТП (от 01 до 12); r – номер тиристора в сборке (от 1 до 3); m – обозначение мгновенного значения

**Рис. 2.** Структурная схема унифицированного тиристорного преобразователя

Мгновенные значения токов в ветви тиристора регистрируются модулем ПИТ путём измерения напряжения на шунтирующем резисторе с последующим преобразованием напряжения в ток. Первичное преобразование мгновенных значений тока и напряжения на обмотке PF_i выполняется пояском Роговского и первичным преобразователем напряжения (ППН) соответственно. Регистрация и предварительная обработка этих значений осуществляется модулем БПОС. Прямые измерения включают следующие процедуры:

1. Преобразование датчиком мгновенного значения тока или напряжения в нормированный сигнал 0...5 В.
2. Опрос датчиков системой диагностики для регистрации мгновенных значений токов и напряжений.
3. Пересчёт мгновенных значений в единицы физических величин.

Мгновенные значения параметров в конечном итоге используются для расчёта действующих значений (ДЗ), которые необходимы для выполнения функций управления и оперативной диагностики, т. к. на основании мгновенных значений параметров данные функции не реализуемы. Расчет действующих значений электрических параметров ИП выполняется на основании группы мгновенных значений, полученных с частотой дискретизации $f_d=9$ кГц за временной интервал $T=1,6(6)$ мс с момента работы источника питания. Выбор частоты дискретизации и интервала для расчёта действующих значений был сделан исходя из следующих условий:

1. Цикл управления источниками питания не должен превышать 3,33 мс (60 эл. град. при частоте напряжения в сети 50 Гц), т. к. на этом интервале времени осуществляется переключение пары работающих тиристорных согласно временной диаграмме работы мостового преобразователя [3], и, соответственно, возникает возможность изменения угла управления преобразователем.
2. Аварийное отключение ИП должно осуществляться с таким же быстродействием, как и управление.
3. Необходимо регистрировать изменение тока в обмотке, связанное с переключением каждого тиристора в преобразователе. В 12-ти пульсовой схеме выпрямления интервал между каждым переключением тиристора составляет 1,6(6) мс.
4. Частота дискретизации должна быть достаточной для того, чтобы расчёт действующего значения тока проводился с погрешностью не более 1 %. При регистрации параметров с частотой 9 кГц погрешность измерения меньше 1 %.
5. Из-за большого количества точек измерения для одного ИП (от 76) частота дискретизации не должна быть избыточной, т. к. с ростом частоты увеличивается количество информации, которое можно передать по каналам связи и сохранить в ИИС.
6. Объектом управления (нагрузкой ИП) является индуктивно-резистивная нагрузка (обмотка), поэтому ток в неё вводится с нарастанием, определяемым индуктивностью. Следовательно, целесообразно увеличить разрешение измерения для уменьшения количества информации, сохраняемой в ИИС.

На имитационной модели ИП обмотки PF , созданной в программе *Simulink*, был получен график напряжения в обмотке. Увеличенный фрагмент графика представлен на рис. 3.

В интервал $T=1,6(6)$ мс (30 эл. град.) при частоте $f_d=9$ кГц укладывается 15 мгновенных значений параметров (отсчитываемых через интервал времени $\Delta t=0,1(1)$ мс), на основании которых рассчитывается действующее значение по формуле

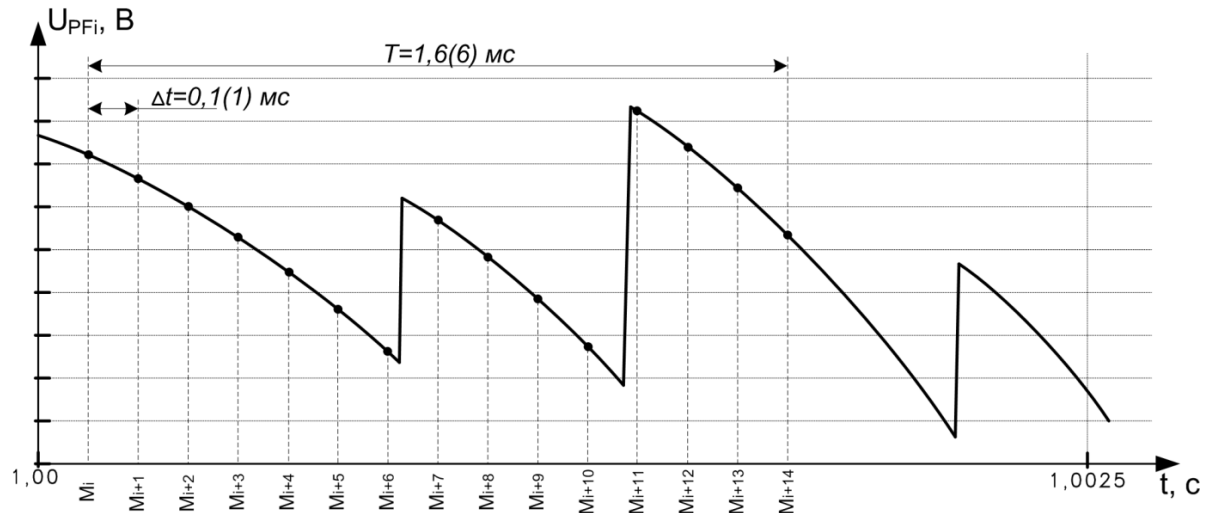


Рис. 3. Вид напряжения на обмотке PFi при угле открытия тиристоров $\alpha=10^\circ$

$$D = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{y=1}^{15} M^2(y)}, \quad (*)$$

где D – действующее значение параметра, $M(y)$ – мгновенное значение параметра за y -ый отсчёт.

Перечень параметров, получаемых расчётным путём, представлен в табл. 2.

Таблица 2. Таблица параметров источников питания обмоток PF_1-PF_6

| Технологическое обозначение | Наименование параметра | Обозначение | Кол-во | Диапазон измерения | Ед. изм. |
|---|---|----------------|--------|---------------------------|-------------------|
| Блок релейной защиты трансформатора | ДЗ тока (по фазам) | I_{Tz}^d | 6 | ± 3 | кА |
| | ДЗ напряжения (по фазам) | U_{Tz}^d | 6 | 0...500 | В |
| Унифицированные тиристорные преобразователи | ДЗ тока ветви тиристора | I_{XYnr}^d | K | ± 2500 | А |
| | ДЗ напряжения на выходе преобразователя | U_{XY}^d | 2 | 0...500 | В |
| | Сумма ДЗ тока в ветвях тиристор | I_{PFisum}^d | 1 | ± 30 | кА |
| | Параметр теплового эквивалента I^2t | IT_{XYnr} | K | $(3,25...4,5) \cdot 10^6$ | А ² ·с |
| Нагрузка: обмотка PF_i | ДЗ напряжения на нагрузке (обмотка PF_i) | U_{PFi}^d | 1 | 0...500 | В |
| | ДЗ тока в нагрузке (обмотка PF_i) | I_{PFi}^d | 1 | ± 30 | кА |

z – число, обозначающее точку измерения. Для фазы А первой обмотки $z=1$, для фазы В первой обмотки $z=2$, для фазы С первой обмотки $z=3$, для фазы А второй обмотки $z=4$, для фазы В второй обмотки $z=5$, для фазы С второй обмотки $z=6$

По формуле (*) рассчитываются действующие значения напряжения на выходе преобразователя, напряжения на обмотке управления, действующий

ток в обмотке. Действующие значения тока и напряжения с преобразующих трансформаторов поступают в систему диагностики ИП уже рассчитанные из подсистемы диагностики трансформаторов (БРЗТ). Для получения действующего значения тока в обмотке, равного сумме значений токов в ветвях тиристор используется следующий алгоритм: суммируются мгновенные значения тока в ветвях тиристор анодной группы всех УПТ источника питания, относящиеся к одному моменту времени (I_{PFisum}^m) по формуле

$$I_{PFisum}^m = \sum_{n=1,3,5...11} \left(\sum_{r=1}^3 I_{XYnr} \right).$$

Действующее значение тока в обмотке (I_{PFisum}^d) рассчитывается на основании 15-ти мгновенных сумм на интервале времени $T=1,6(6)$ с по формуле

$$I_{PFisum}^d = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{y=1}^{15} I^2(y)_{PFisum}^m}.$$

Параметр теплового эквивалента IT_{ic}^d характеризует количество тепла, выделяемого на тиристоре за счёт протекания через него тока и рассчитывается для каждого тиристора на основании мгновенных значений тока в ветви тиристора на интервале времени 0,02 с (180 отсчётов) по формуле

$$IT_{XYnr} = \left(\sqrt{\frac{1}{180} \sum_{y=1}^{180} I^2(y)_{XYnr}^d} \right)^2 \cdot 0,02.$$

Все измерения и расчеты ДЗ параметров производятся на скользящем интервале без синхронизации с начала и до конца работы ИП.

Для составления алгоритмов контроля параметров ИП в целях противоаварийной защиты и предупредительной сигнализации составлен список возможных аварийных ситуаций:

- Выход из строя отдельного тиристора, который может потерять вентильные свойства вслед-

ствии перегрева или пробоя чрезмерно высоким напряжением;

- Короткое замыкание на шинах переменного или выпрямленного тока;
- Недопустимая перегрузка/короткое замыкание;
- Двухфазное или однофазное опрокидывание инвертора (прорыв инвертора), которое может произойти в режиме инвертирования тока из обмотки в сеть [4];
- Непредвиденное отключение напряжения в сети переменного тока 10 кВ при работе ИП в нормальном или инверторном режиме;
- Отсутствие синхросигнала от блока фазовой синхронизации;
- Техническая неисправность системы управления.

На основании перечисленных возможных аварийных ситуаций и перечня действующих значений параметров ИП составлен перечень параметров контроля и оперативной диагностики ИП (табл. 3). В перечне параметров контроля и диагностики определены контролируемые параметры ИП обмоток PF_i , регламентные уставки для каждого из параметров и защитные действия при превышении нормы на 1 %.

Таблица 3. Таблица параметров контроля и оперативной диагностики ИП

| Параметр | Уставка | Контрольная процедура | Защитное действие |
|-------------------|--|---|---|
| U_{PFi}^d | 950 В | Сравнение с уставкой $U_{PFi}^d > 950$ | Аварийное отключение ИП |
| I_{PFi}^d | ± 15 кА для $i=1,2,3,6$ ± 30 кА для $i=4,5$ | Сравнение модуля параметра с уставкой $ I_{PFi}^d > 15/30$ | |
| ΔI_{XYnr} | 0,1 (10 %) | Сравнение с уставкой $\Delta I_{XYnr} > 0,1$ | Блокировка запуска, предупредительное сообщение |
| ΔI_{PFi} | 0,05 (5 %) | Сравнение с уставкой $\Delta I_{PFi} > 0,05$ | |
| U_{XY}^d | 950 В | Сравнение с уставкой $U_{XY}^d > 950$ | Аварийное отключение ИП |
| IT_{XYnr} | $3,25 \cdot 10^6$ А ² ·с | $IT_{XYnr} < 3,25 \cdot 10^6$ | Блокировка запуска, предупредительное сообщение |
| I_{Tz}^d | 12,5 кА | Сравнение с уставкой $I_{Tz}^d > 12,5$ | Аварийное отключение ИП |
| U_{Tz}^d | 370 В | $U_{Tz}^d > 370$ | |
| SYNC | Наличие синхросигнала | Проверка наличия синхросигнала | |

Значения уставок по току и напряжению на обмотке, напряжению на выходе УТП, току и напряжению на вторичных обмотках трансформатора определяются как максимально допустимые значения, исходя их характеристик силовых элементов ИП.

В качестве уставки для параметра теплового эквивалента принято паспортное значение для тиристора SKT1200 за период 20 мс. Параметр IT_{XYnr}

сравнивается с уставкой, и если он меньше $3,25 \cdot 10^6$, то делается вывод о перегреве тиристора, и выполняется соответствующее защитное действие.

Разбаланс действующих значений токов в ветвях тиристорных относительно среднего значения характеризует неравномерность токов, протекающих через параллельно соединённые тиристоры:

$$\Delta I_{XYnr} = \left| \frac{\sum_{r=1}^3 I_{XYnr} - I_{XYnr}}{3} \right|.$$

Значение разбаланса токов тиристорных в преобразователе не должно превышать 10 %, что соответствует техническим условиям на УТП. Вычисление разницы между суммой токов в ветвях тиристорных и током в обмотке (измеряется системой управления плазмой независимо от СЦУ ИП) необходимо для определения адекватности работы измерительных каналов и вычислительных систем. Если разница значений превышает 5 %, то делается вывод о неисправности в измерительной системе или возникновении ошибки в вычислительной системе, и выполняется соответствующее защитное действие. Расчёт производится по формуле

$$\Delta I_{PFi} = \left| \frac{I_{PFi}^d - I_{PFisum}^d}{I_{PFisum}^d} \right|.$$

При отсутствии сигнала с датчика тока на обмотке можно осуществлять управление источником питания на основании данных с блоков ПИТ (вместо действующего тока в обмотке использовать сумму токов в ветвях тиристорных I_{PFisum}).

Так же необходима проверка наличия синхросигнала SYNC от центрального блока синхронизации.

Возможны два вида защитных действий при возникновении аварийной ситуации:

1. Аварийное отключение, которое предполагает отключение ИП от сети 10 кВ при помощи управляемого размыкателя одновременно с открытием всех тиристорных в УТП за счёт подачи угла открытия $\alpha=0^\circ$.
2. Блокировка запуска, которая предполагает запрет на включение ИП и выдачу предупредительного сообщения оператору.

Алгоритмы измерения параметров и оперативной диагностики были опробованы на макете источника питания обмотки PF в Томском политехническом университете, и была показана их работоспособность. Описанные алгоритмы можно применять для оперативной диагностики источников питания, в которых используются трёхфазные тиристорные выпрямители.

Работы выполнены в Томском политехническом университете по заказу Национального ядерного центра Республики Казахстан в рамках проекта по созданию Казахского материологического токамака КТМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизов Э.А., Тажибаева В.С. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы термоядерного синтеза. – Алматы, 2006. – 236 с.
2. Павлов В.М., Байструков К.И., Сьянов А.А. Программное обеспечение системы управления источниками питания обмоток магнитного поля установок типа ТОКАМАК // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 7. – С. 15–19.
3. Немцев Г.А., Ефремов Л.Г. Энергетическая электроника. – М.: Пресс-сервис, 1994. – С. 85–87.
4. Беркович Е.И., Ковалев В.Н., Ковалев Ф.И. и др. Полупроводниковые выпрямители. – М.: Энергия, 1978. – 448 с., ил.

Поступила 30.03.2009 г.

УДК 681.5

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ УЗЛОВ ИНТЕРПОЛИРОВАНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И СИНТЕЗА САУ ВЕЩЕСТВЕННЫМ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

С.В. Замятин, Д.А. Плотников, А.С. Алексеев

Томский политехнический университет
E-mail: zamsv@tpu.ru, plotdm@gmail.com

Рассмотрены результаты работы алгоритмов автоматической настройки коэффициентов регулятора САУ на основе вещественного интерполяционного метода. Показано влияние положения узлов на основные показатели качества системы управления, получаемой в результате синтеза. Приведены оценки точности получаемых решений.

Ключевые слова:

Идентификация, автоматическая настройка, вещественный интерполяционный метод.

В современной теории управления одной из важных задач является задача управления объектом в условиях изменения его параметров. Данная задача характерна для всех реальных систем автоматического управления. Изменение параметров объекта может происходить по разным причинам: влияние внешних воздействий, старение оборудования, также это может являться особенностью объекта, как, например, изменение массы груза и длины тросов в подъемных механизмах.

В настоящее время существует два основных пути решения подобных задач. Первый путь – это поиск такого стационарного закона управления, который обеспечил бы функционирование системы или даже гарантировал некоторое качество ее работы при любых возможных изменениях параметров объекта. Такой подход называется робастным [1]. Его преимущества заключаются в простоте аппаратной реализации и, как следствие, надежности. Хотя поиск такого закона управления достаточно трудоемок. Недостатком данного подхода является то, что величина области изменения параметров объекта значительно зависит от требований, предъявляемых к качеству работы системы.

Второй путь, позволяющий решать подобные задачи – создание самонастраивающейся системы управления, закон управления которой изменяется в зависимости от изменения параметров объекта [2–4]. Основным преимуществом данного подхода является возможность обеспечить желаемое качество работы системы при значительных изменениях параметров объекта. Под желаемым качеством

здесь понимается функционирование системы с требуемыми прямыми показателями качества переходных процессов. Подобное свойство становится еще более важным, если речь идет о многоконтурных системах. В таком случае сохранение формы переходных процессов, а значит и математической модели, внутренних контуров позволяет использовать стационарные регуляторы внешних контуров.

Вещественный интерполяционный метод

Разработанные алгоритмы опираются на вещественный интерполяционный метод [1], включающий совокупность подходов, приемов и алгоритмов расчета и исследования динамических систем. Метод базируется на вещественном интегральном преобразовании, которое определено формулой прямого перехода

$$F(\delta) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-\delta t} dt, \quad \delta \in [C, \infty], \quad C \geq 0,$$

в которой функции-оригиналу $f(t)$ ставится в соответствие изображение $F(\delta)$

Соотношение имеет смысл прямого преобразования и получило название δ -преобразования.

Для выполнения математических преобразований вещественных функций с помощью вычислительной техники необходимо осуществить переход от непрерывных функций-изображений $F(\delta)$ к их дискретным аналогам. Дискретной формой вещественных функций-изображений является численная характеристика (ЧХ). Она определена как со-